Etude No. 91
IGM83-148-091

Traitement par laser de matériaux céramiques

par P. Cielo et S. Dallaire

2 novembre 1983

Résumé

Des essais ont été faits à la requête de la compagnie Crane de St-Jean d'Iberville, pour vérifier la faisabilité de traiter localement au laser des défauts de surface sur des tuiles céramiques. Ceci permettrait de recycler des pièces défectueuses sans être obligé de refaire le long procédé de traitement thermique dans le four. Les résultats obtenus avec un laser CO_2-CW de puissance moyenne sont encourageants.

Distribution: G. Bata
J. Bussière
D. Lefrançois (Crane Ltd.)
H. Marquis

CNRC 21372

1. Introduction

La compagnie Crane a contacté l'IGM au cours de l'été '83 pour discuter de la possibilité de traiter localement au laser des défauts de surface sur des matériaux céramiques (produits sanitaires en argile émaillée). Si les défauts de surface (points non émaillés, trous, protubérances etc.) sont assez petits, la pièce serait récupérable. Actuellement, on enlève le défaut au moyen d'un outil. On remplit ensuite manuellement le trou d'une pâte de céramique. Après, la pièce est repassée dans le four. Le traitement au four est très long (typiquement 48 heures) et constitue le coût principal de fabrication de ces matériaux. La possibilité d'un traitement thermique localisé, qui permettrait d'éviter de recycler certaines pièces a été envisagé par la compagnie. Des sources thermiques commme des torches ou des lampes à l'infrarouge focalisées ont été essayées à cette fin. Ces sources se sont toutefois révélées inadéquates pour des raisons de puissance insuffisante, de production de résidus de combustion ou encore d'introduction de contraintes thermiques excessives provoquant le bris de la pièce.

La possibilité d'utiliser un laser a donc été discutée avec l'IGM, dans l'espoir de pouvoir fondre rapidement une région localisée tout en évitant de chauffer un volume important de la pièce. L'IGM a accepté de faire les expériences exploratoires dans ce sens, en utilisant un laser CO_2 continu de 10 watts loué chez la compagnie MPB de Dorval.

2. Analyse thermique

Lors du chauffage d'un matériau par une source thermique continue focalisée sur la surface, la distribution de la température à travers le matériau peut s'exprimer dans le cas d'une source ponctuelle (réf. 1):

$$T(r, t) = (Q/ 2\pi Kr)\ \mathrm{erfc}\ [r/(4\alpha t)^{1/2}] \qquad (1)$$

où Q est la puissance absorbée, K est la conductivité thermique du matériau, α est la diffusivité thermique, r est la distance radiale du point chauffé, et t est le temps depuis le début du chauffage. La distribution thermique tend à une configuration stationnaire, pour $t >> r^2/4\alpha$:

$$T(r) = (Q/2\pi Kr) \qquad (2)$$

Cette équation montre que la température à un point donné est inversement proportionnelle à la distance r du point irradié, et aussi à la conductivité thermique K du matériau. On peut donc atteindre pour des céramiques ($K \sim 10^{-3}$ à 10^{-1} W/cm °K) des températures de plusieurs ordres de grandeurs plus élevés que pour des métaux ($K \sim 1$ W/cm °K), à parité de puissance absorbée.

L'expression (2), obtenue dans le cas d'une source ponctuelle, prévoit une température infinie à r = 0. Dans les cas réels, la région irradiée a une certaine extension, de sorte que la température à r = 0 a une valeur finie. Afin d'étudier l'effet de la largeur de la zone irradiée sur la distribution thermique, nous avons utilisé un modèle numérique à différences finies (réf. 2). Il s'agit d'un modèle axisymétrique résolu dans le temps, qui couvre un volume cylindrique de 25 mm de profondeur et 50 mm de diamètre avec une résolution de 0,1 mm. Une distribution thermique stationnaire obtenue dans le cas du chauffage de la surface par un faisceau laser ayant un diamètre de 0,6 mm est montrée à la fig. 1. Les nombres imprimés correspondent aux températures en degrés C dans un élément de volume, à travers une section axisymétrique normale à la surface et contenant le centre de la zone circulaire irradiée. On a supposé une puissance absorbée de 10 watts et une conductivité thermique de 0,015 W/cm °K (réf. 3).

On peut remarquer que pour obtenir une zone fondue (isotherme à 1200°C approximativement) dont le rayon est de l'ordre de 1 mm on obtient des températures maximales au centre du faisceau de plus que

5000°C, bien au-delà de la température de vaporisation. Une distribution thermique plus acceptable est montrée à la fig. 2, où le diamètre du faisceau est de 2 mm. Comme on le constate, il est souhaitable d'utiliser une largeur de la région irradiée de l'ordre de quelques mm afin de fondre la zone voulue sans vaporiser ou décomposer le matériau. D'un point de vue pratique, ceci peut être obtenu très facilement soit en défocalisant le faisceau, soit en déplaçant le faisceau pendant le chauffage sur la zone à fondre.

Le temps requis pour fondre la surface peut être évalué à partir des fig. 3 et 4, qui donnent le profil thermique à la surface, à différents instants après le début de l'irradiation. Dans le cas du faisceau de 0,6 mm de diamètre, fig. 3, on voit que la région centrale irradiée monte à la température de vaporisation après 0,1 sec, tandis qu'il faut 10 sec pour atteindre la configuration pratiquement stationnaire où le diamètre de la zone fondue est d'environ 2 mm. Les courbes correspondantes à un faisceau de 2 mm de diamètre, fig. 4, sont plus favorables: le diamètre de la zone fondue est d'environ 1,5 et 2,2 mm, respectivement après 1 et 10 sec, tandis que la température de pointe ne dépasse jamais les 2200°C. Ces temps de réponse se prêtent bien à la vitesse de réaction d'un opérateur.

3. Résultats expérimentaux

Des tuiles céramiques de couleur blanche, de dimensions 10 x 10 x 1 cm ont été traitées avec un laser CO_2 de 10 watts, loué chez la compagnie MPB de Dorval. On a mesuré la réflectivité de l'émail à la longueur d'onde de 10,6 µm de ce laser qui est résultée être de 20%, ce qui donne une puissance totale absorbée de 8 watts.

3.1 Traitement de surfaces planes

On a d'abord traité des surfaces sans défauts afin de vérifier les résultats de l'analyse thermique, d'étudier l'effet des courants de convection thermique dans le bain liquide et de vérifier la stabilité des oxydes en cours d'irradiation. La fig. 5 montre la

configuration expérimentale. Le diamètre d du faisceau laser pouvait être varié en variant la distance δ entre le plan focal de la lentille et la surface à traiter.

Les résultats obtenus dans les différents essais avec différents diamètres du faisceau laser et temps d'exposition sont résumés au tableau 1. En accord avec l'analyse thermique, les meilleurs résultats sont obtenus avec un diamètre du faisceau laser d'environ 2 mm et des temps d'exposition de quelques secondes. Des diamètres plus larges du faisceau ne permettent pas d'atteindre le point de fusion, tandis que des diamètres plus petits mènent à la vaporisation et à la décomposition du matériau. Un exemple d'une zone surchauffée est montré sur la micrographie montrée à la fig. 6. On peut voir une zone plus foncée au centre de la région fondue. Cette coloration est probablement due à la décomposition des oxydes. Des bulles apparaissent aussi provoquées par les gaz emprisonnés dans le matériau. Rappelons que la pièce de céramique sous-jacente est essentiellement poreuse, le but de l'émail étant de cautériser la surface. Par contre, quand le diamètre du faisceau est plus large, l'émail à la surface est fondu sans noircissement visible. Des microfissures dues aux fortes contraintes thermoélastiques pendant le refroidissement sont toujours présentes, mais elles sont suffisamment petites pour ne pas causer trop de préjudice esthétique à la pièce.

La fig. 2 montre des tracés profilométriques de la surface après traitement au laser. Dans le cas du traitement avec large diamètre, fig. 7a, on voit que la surface fondue présente un profil convexe, dû probablement aux courants de convection dans le bain liquide. Dans le cas du traitement à plus haute concentration d'énergie (essai n° 6, au tableau 1, accompagné de noircissement visible) on peut remarquer la formation d'un cratère d'environ 20 µm de profondeur au centre de la zone fondue, qui est dû à l'éjection et à la vaporisation du matériau.

3.2 Traitement de la pâte d'apport

La plupart des défauts sont réparés en enlevant mécaniquement quelques mm^3 de matériau dans la région défectueuse en la remplissant de pâte d'apport (glaçure en poudre et eau), et en passant ensuite la pièce au four. Afin d'éliminer l'étape coûteuse du traitement thermique au four, on a donc essayé de traiter au laser la pâte d'apport.

Des éraflures d'une profondeur d'environ 1 mm ont été pratiquées par un outil au diamant sur la surface d'une tuile. Les sillons ont été ensuite remplis avec une pâte à l'eau. On laisse sécher cette pâte pendant un jour avant de la traiter au laser. Les résultats ont toutefois été décevants car dans la plupart des cas la pâte d'apport se soulevait pendant traitement.

Plusieurs méthodes ont été essayées afin de résoudre le problème du soulèvement de la pâte d'apport. La fig. 8 (a) montre le résultat d'une passe rapide (laser de 1 mm de diamètre balayé de haut en bas sur la figure 8 (a) à une vitesse d'environ 5 mm/s, soit un temps d'exposition d'environ 0,2 sec) afin de traiter la surface sans trop affecter l'interface pâte-substrat, comme on peut voir sur la figure, la pâte a quand même levé partiellement. La fig. 8 (b) montre des sillons (deux sillons remplis de pâte sont visibles dans cette figure) qui ont d'abord été traités à basse température (laser de 3 mm de diamètre pendant 3 sec) afin de laisser s'échapper l'humidité incluse dans la poudre et d'en augmenter l'adhérence au substrat, et ensuite traités en surface avec une passe rapide (1 mm de diamètre, o,1 sec de temps l'exposition). Comme on voit à la fig. 8 (b), la pâte n'a pas levé dans ce cas, mais la surface fondue n'est pas lisse.

Des essais ont été faits en utilisant des véhicules autres que l'eau et en y incorporant des liants qui maintiendraient les particules de glaçure les unes collées aux autres et contre le substrat. L'avantage du liant réside dans le fait que, jusqu'à une

certaines température, la poudre de glaçure demeure en place. Elle n'est pas soufflée par l'impulsion thermique. Le liant utilisé en solution aqueuse a été l'alcool polyvinylique. D'autres liants de type vinylique ont été aussi dissous dans des liquides organiques tels l'acétone et le trichloroéthylène. Les liants améliorent la tenue de la poudre sur le substrat tel qu'indiqué aux figures 8a et 8b. Cependant, parce qu'ils contiennent des substances organiques qui n'ont pas le temps de s'évaporer, ils laissent des résidus qui pourraient nuire à l'aspect esthétique des surfaces réparées. De plus, ils ne sauraient éliminer le problème de la diminution du volume accompagnant la fusion de la glaçure tel qu'on peut le voir clairement à la figure 8a. L'utilisation d'un liant inorganique du type silicate est plus appropriée mais n'élimine pas le problème de la diminution de volume.

3.3 Injection de poudre de glaçure pendant le traitement

Afin d'éviter tous ces problèmes, une technique d'injection de poudre de glaçure directement dans le bain de fusion a été essayée. Pour injecter directement la poudre dans le bain, il faut utiliser un dispositif de transport adéquat. Le transport pneumatique (poudre véhiculée au moyen d'un gaz) a été choisi. On peut généralement alimenter de faibles quantités de poudre (typiquement quelques grammes par minute) avec une très bonne régularité et contrôler la vitesse d'injection des particules. Ce type de transport de poudre a été sélectionné en outre à cause de sa disponibilité. C'est le même mécanisme d'alimentation de poudre que nous utilisons en projection par plasma.

Afin de calibrer l'alimenteur de poudre, des essais préliminaires ont eu lieu. De singulières difficultés sont survenues avec le premier lot de poudres fournies par CRANE LTD. Cette poudre de glaçure composée de particules dont le diamètre devait être inférieur à 74 µm (indiqué - 200 mesh), s'agglomérait et colmatait l'alimenteur. Le second lot de poudres comprises entre - 200 et + 325 mesh s'alimentait un peu mieux. Cependant, la poudre

avait tendance à colmater.

Bien que cette poudre soit difficile à convoyer pneumatiquement, des essais ont toutefois eu lieu. A sa sortie du distributeur, la poudre était canalisée dans un petit tube de 1 mm de diamètre intérieur. L'extrémité de ce tube était maintenue à environ 3 mm du bain de fusion. Le taux d'injection de la poudre était d'environ 0.02 g/s.

La fig. 9 montre deux vues du montage expérimental, tandis que la fig. 10 montre une micrographie d'une région où la glaçure a été projetée et partiellement fondue pendant l'irradiation au laser. Notre montage plutôt rudimentaire rendait difficile la superposition soit dans l'espace que dans le temps de la projection de la poudre avec la fusion au laser avec le résultat que la plupart de la poudre a été projetée en dehors du bain fondu, tandis que les temps d'exposition laser ont été souvent trop longs et le laser trop concentré ce qui a provoqué la décomposition de la glaçure à côté du point visé. Malgré cela, on a constaté que la glaçure projetée dans le bain fondu a bien adhéré au substrat, produisant une bosselette d'environ 1 mm^3 claire et solidement attachée à la surface. Cette approche nous semble donc fort prometteuse, et il s'agirait maintenant de construire un système d'injection de la glaçure et de manipulation du faisceau laser plus précis et plus facile d'utilisation par un opérateur non spécialisé. Rappelons que la glaçure est un oxyde complexe qui a la fâcheuse tendance à s'agglomérer et à rendre difficile le transport.

4. Conclusion

La possibilité de traiter localement au laser des défauts de surface dans des matériaux céramiques a été démontrée expérimentalement. La refusion de la surface peut se faire avec peu de vaporisation et de décomposition thermique du matériau en autant que le diamètre du faisceau laser est choisi convenablement. Les temps d'exposition requis, de l'ordre de quelques secondes, se

prêtent bien à la vitesse de réaction de l'opérateur. Un laser CO_2 de puissance modérée, typiquement 10 watts, est convenable pour cette application. Le prix d'un tel laser est de l'ordre de $15,000, tandis que sa longueur d'onde de 10,6 µm est bien absorbée par le matériau tout en étant moins dangereuse pour les yeux d'un observateur qu'un laser de longueur d'onde plus courte.

La possibilité d'injecter la poudre directement dans le bain fondu pendant le traitement a été démontrée, et les résultats obtenus avec cette technique ont été fort encourageants. Il reste à concevoir un système mécanique pour la manipulation du faisceau et la projection de la poudre qui soit plus précis et facile à utiliser par l'opérateur. Plusieurs techniques sont concevables pour l'éjection de la poudre, tandis que des guides d'onde sont envisageables pour la transmission du laser en-dessous du bec d'éjection. Un tel guide d'onde opérant à 10.6 µm a été récemment annoncé par la compagnie japonaise Horiba, mais il semble que ce produit n'est pas encore prêt pour le marché.

Les résultats obtenus seront discutés avec la compagnie Crane, avec laquelle on prendra une décision quant aux prochaines étapes dans ce projet.

Bibliographie

1. H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", chap. 10, Oxford Un. Press, 1959.

2. P. Cielo, "Analysis of Pulsed Thermal Inspection", 14th Symp. on NDE, San Antonio, Texas, April 19-21, 1983.

3. Y.S. Touloukian et al., "Thermophysical Properties of Matter", IFI Plenum, New York, 1970.

Tableau 1

Résultats du traitement par laser d'une surface plane

N° essai	Diamètre du faisceau (mm)	Temps d'exposition (sec)	Diamètre de la zone fondue (mm)	Noircissement visible
1	0.5	5	1	oui
2	0.5	3	1	oui
3	0.5	0.5	1	pâle
4	0.75	5	1	oui
5	1.5	10	1.2	oui
6	1.5	5	1.2	oui
7	1.5	1	1.2	pâle
8	2	10	1.5	pâle
9	2	5	1.5	pâle
10	2	2	1.1	non
11	2	1	0	---
12	3.5	60	1.9	non
13	3.5	20	1.8	non
14	3.5	5	0	---

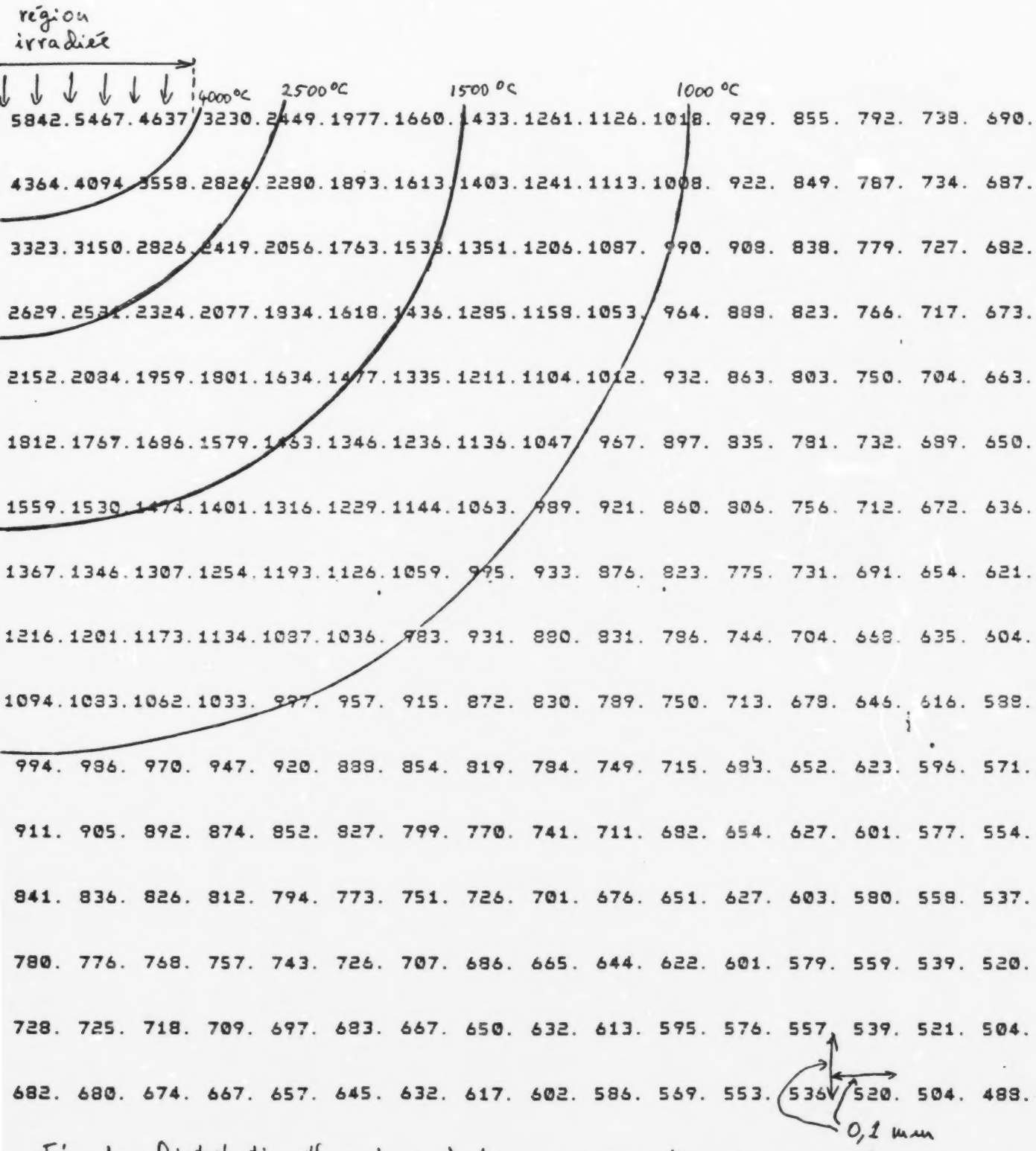


Fig. 1. Distribution thermique à travers une section axisymmétrique, avec un faisceau laser de 0,6 mm de diamètre

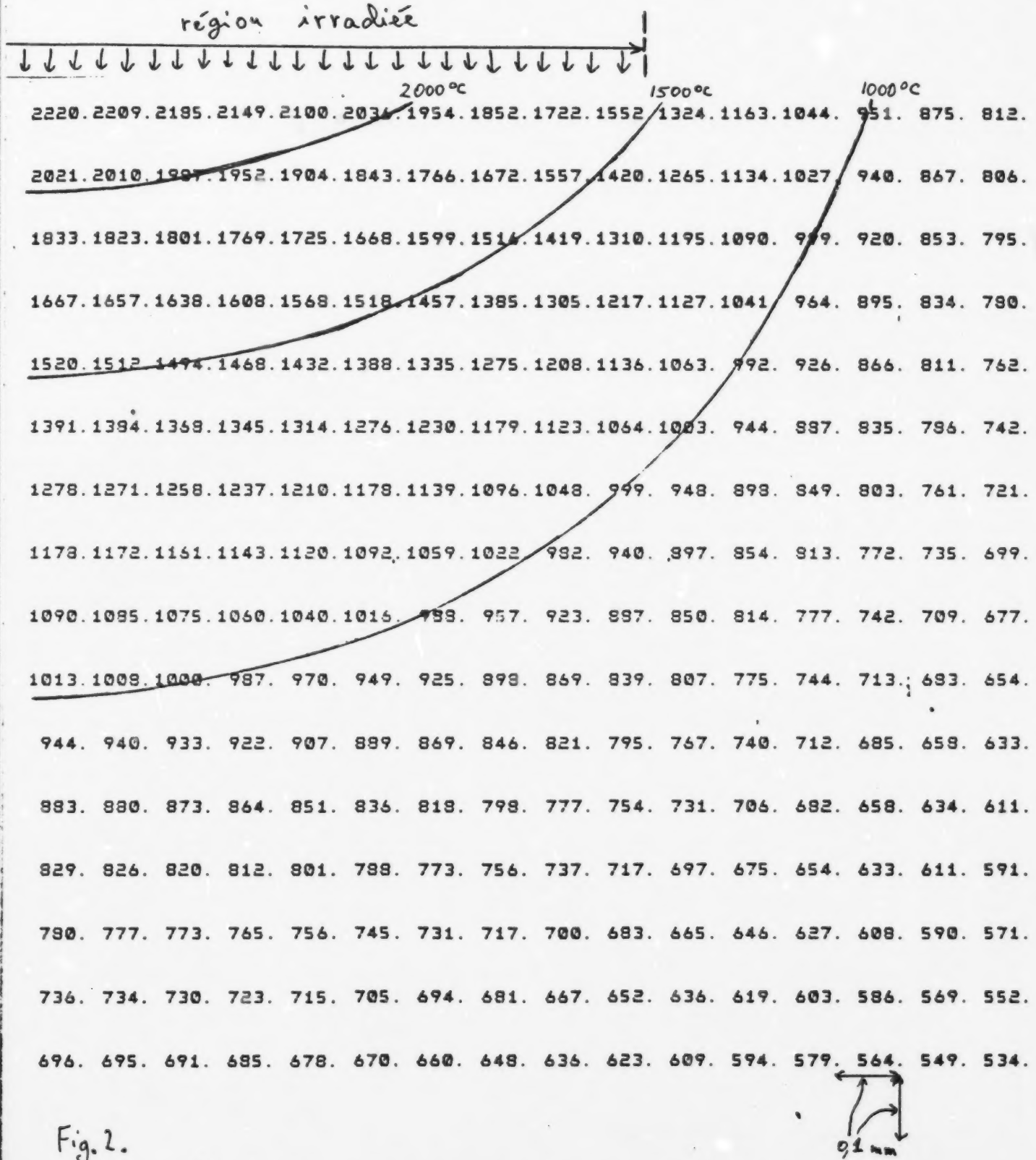


Fig. 2.

Comme en fig. 1, mais avec un faisceau laser de 2 mm de diamètre.

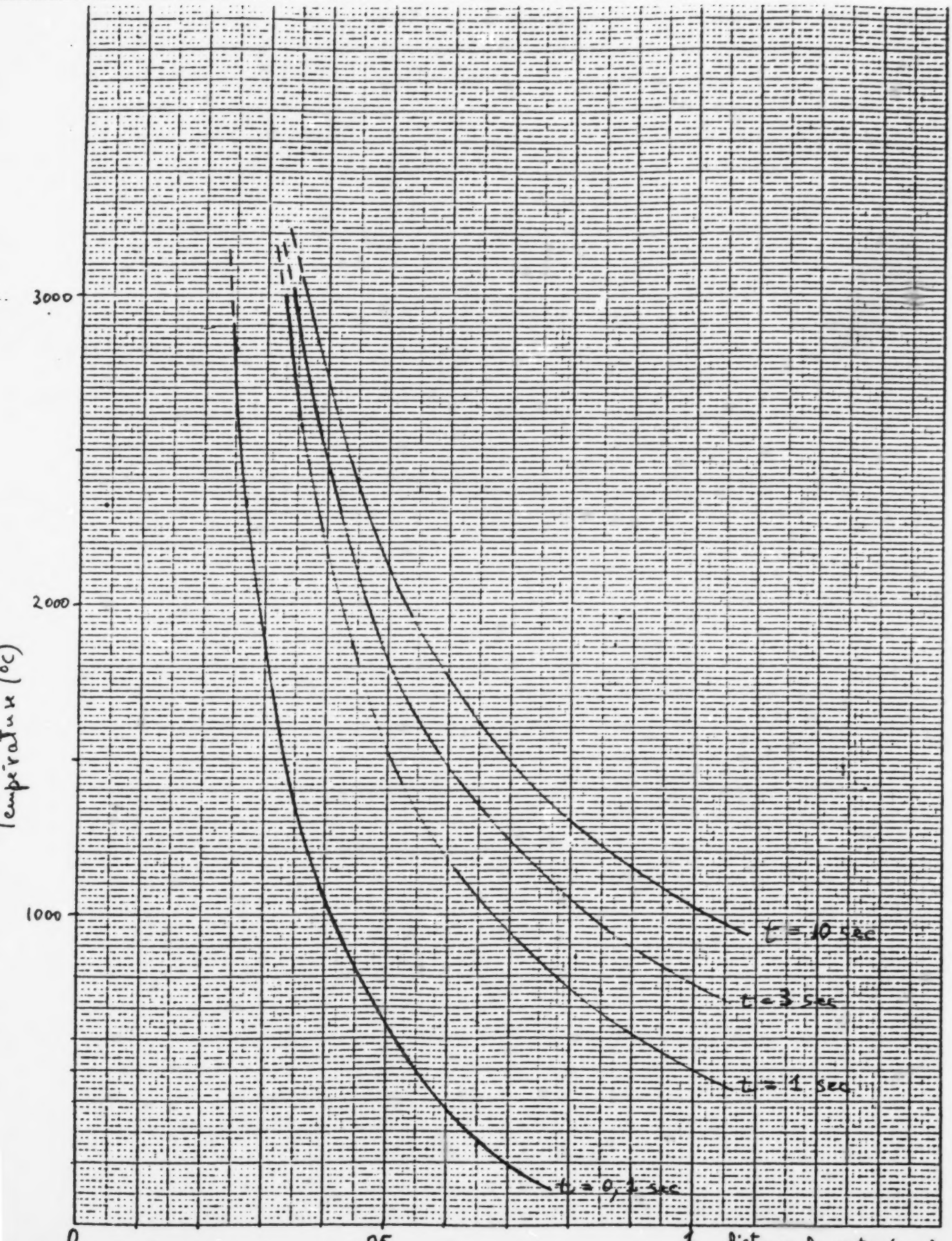


Fig.3 Profil thermique à la surface, faisceau de 0,6mm de diamètre.

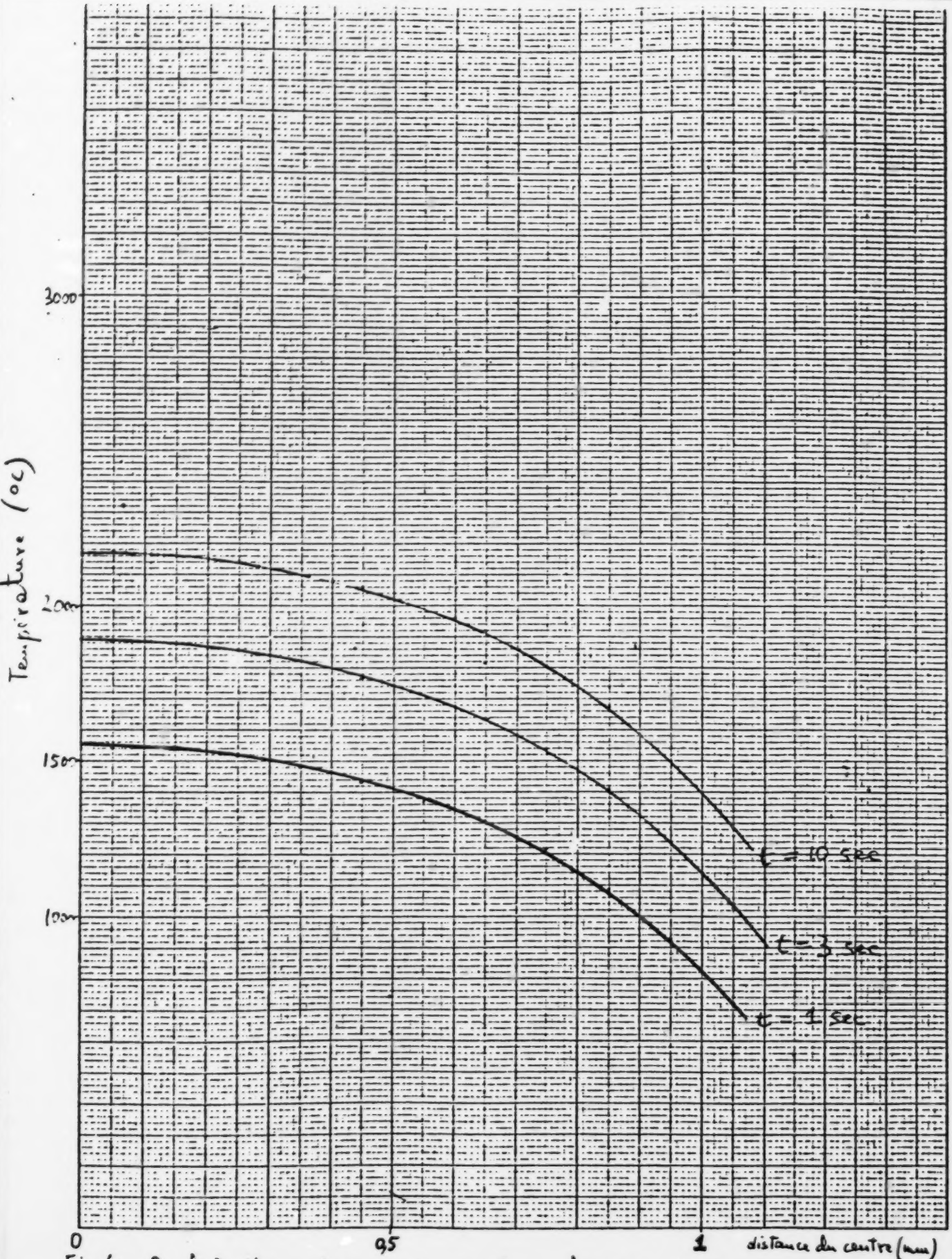


Fig. 4 Profil thermique à la surface, faisceau de 2 mm de diamètre.

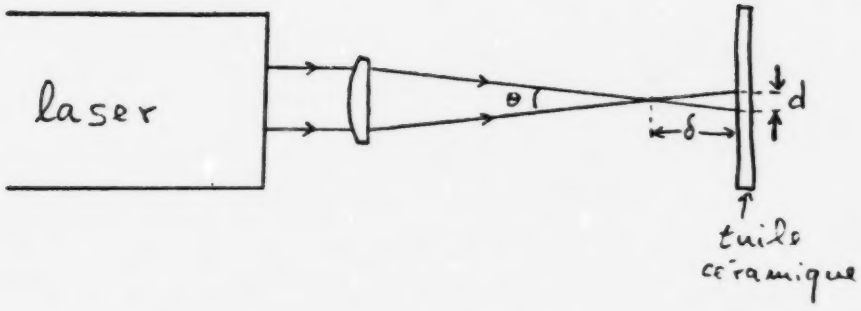


Fig. 5

Configuration expérimentale pour le traitement au laser d'une tuile.

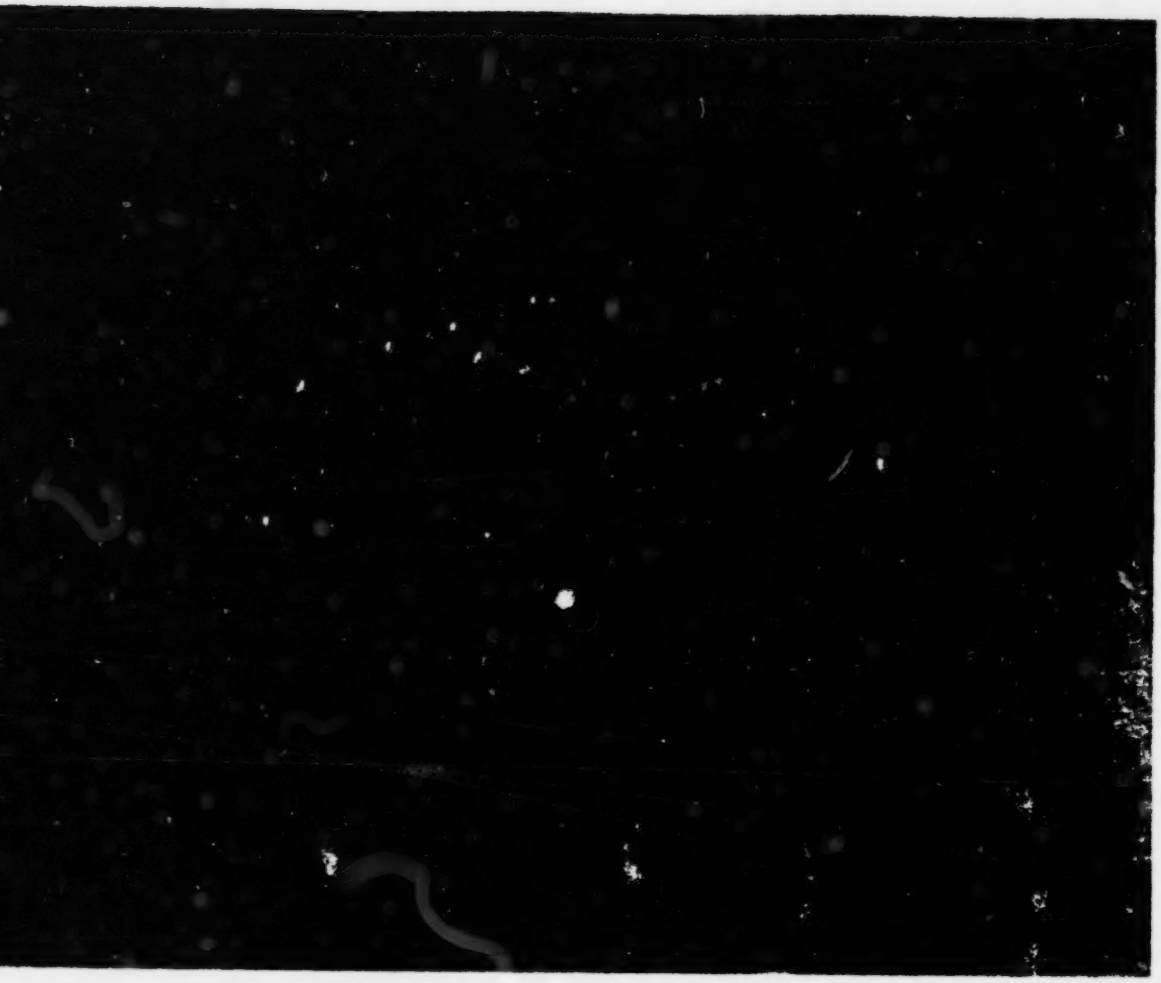


Fig. 6 Point traité au laser avec diamètre de 0,5 mm, temps d'exposition 3 sec.

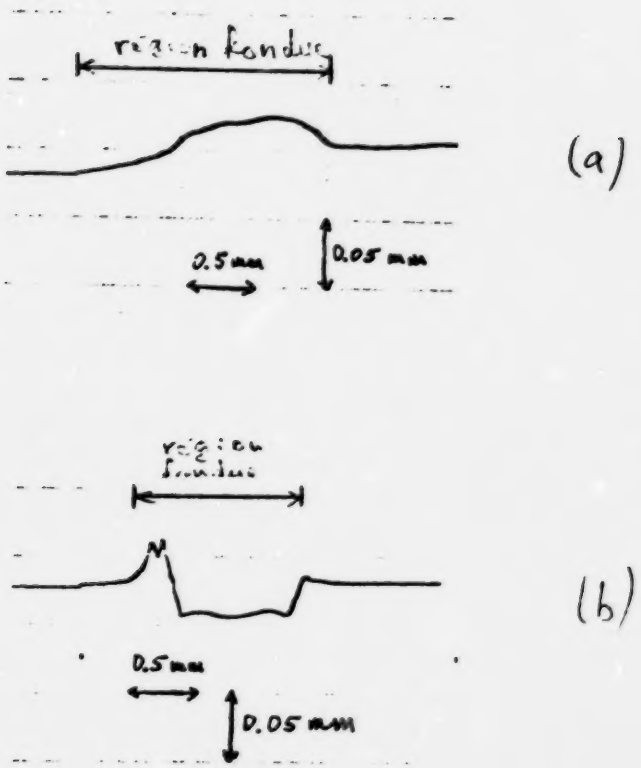
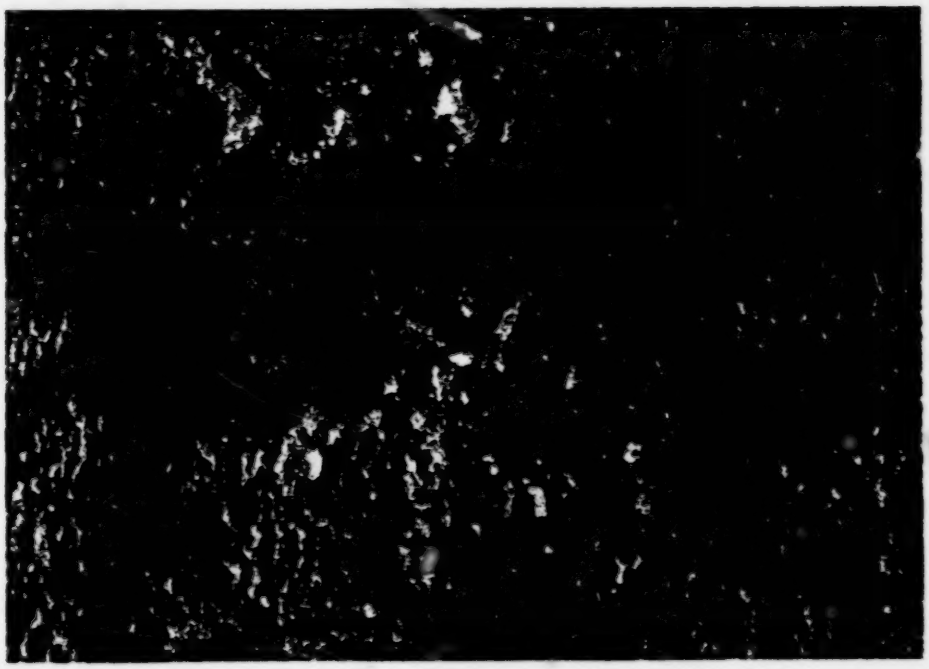


Fig. 7.

Tracés profilométrique de la surface après traitement au laser. (a): diamètre du faisceau 3,5 mm, temps d'exposition 20 sec ; (b): diamètre du faisceau 1,5 mm, temps d'exposition 5 sec.

(a)

|◄ 1 mm ►|



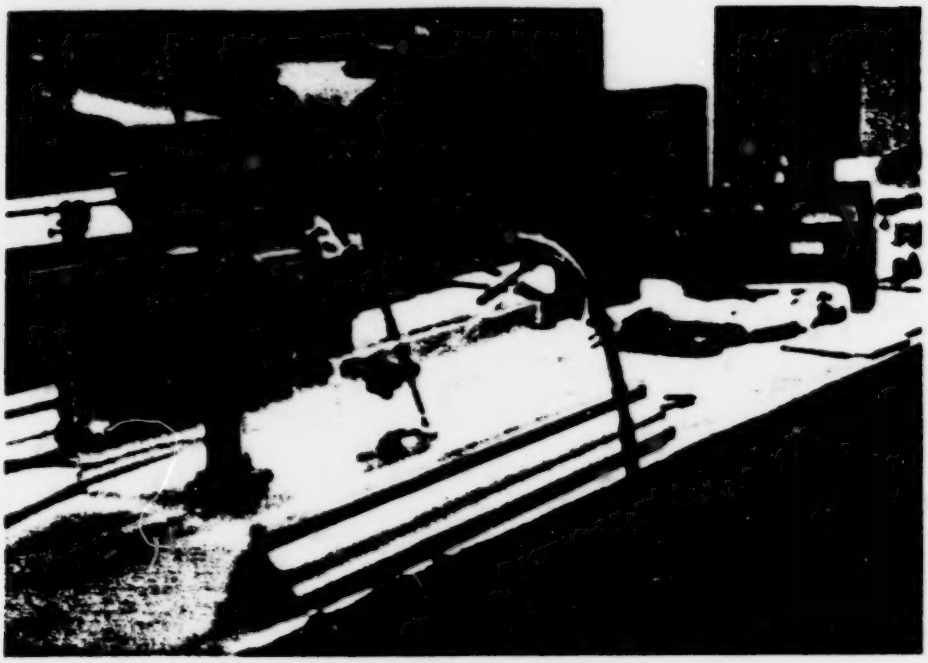
(b)

|◄ 1 mm ►|

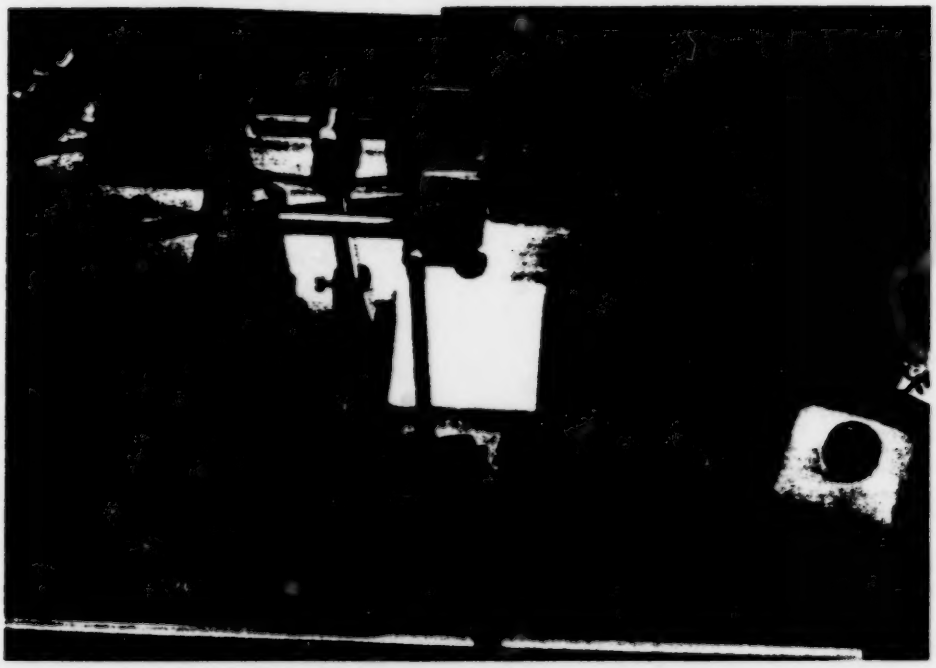
Fig. 8 Traitement thermique de pâte ajoutée.

(a): Décollage de la pâte lors du balayage du faisceau de 1 mm de diamètre à une vitesse d'environ 5 mm/s;

(b): Double passage du laser, d'abord avec un diamètre de 3 mm à 1 mm/s, ensuite avec un diamètre de 1 mm et vitesse de 10 mm/s au même endroit.



(a)



(b)

Fig. 9 Photos du montage expérimental pour l'injection de la poudre pendant l'irradiation.

(a): Vision générale, avec le système d'injection de la poudre en premier plan et le laser en deuxième plan;

(b): Détail de la tuile traitée et du système d'injection.

Fig. 10 Région où la poudre a été injectée et partiellement fondue pendant l'irradiation laser.

POOR

QUALITY

ORIGINAL